

基于单应性矩阵的变焦双目视觉标定方法

姜涛, 程筱胜, 崔海华*, 贾华宇, 张逢骏

南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 针对现有变焦镜头标定方法难度大、动态精度低等问题, 提出一种基于单应性矩阵的动态变焦双目内外参数估计方法和平面快速重建方法。利用双目图像匹配点及变焦前后的匹配点进行两类单应性矩阵估计; 基于变焦数学模型和单应性矩阵, 求解变焦后双目内外参数, 实现畸变后双目参数动态估计与优化; 通过双目图像单应性进行平面快速匹配和重建。实验结果表明, 计算的内外参数与标定结果吻合较好; 变焦后, 推导的单应性矩阵归一化误差小于 0.01, 图像重投影误差小于 1 pixel; 重建精度小于 0.1 mm。

关键词 机器视觉; 变焦双目标定; 单应性矩阵; 变焦镜头; 图像匹配

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0315005

Calibration Method of Binocular Vision System with Zoom Lens Based on Homography Matrix

Jiang Tao, Cheng Xiaosheng, Cui Haihua, Jia Huayu, Zhang Fengjun

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract The existing calibration methods of zoom lens are mostly characterized by great difficulty and low dynamic accuracy. We propose a dynamical estimation method of internal and external parameters based on homography matrix for binocular camera with zoom lens and a fast plane reconstruction method. Firstly, we estimate two types of homography matrix using matching points of binocular images and matching points before and after zooming. Secondly, using mathematic model of zoom lens and the homography matrix, we calculate internal and external parameters of camera pair after zooming to realize the dynamic estimation and optimization of binocular parameters after zoom lens distortion. Finally, we achieve the fast matching and reconstruction of the planes by homography matrix of binocular images. The experiment results show that the calculated internal and external parameters are in good agreement with the calibration results. After zooming, the normalized error of computational homography matrix is less than 0.01, the error of image reprojection is less than 1 pixel, and the accuracy of reconstruction is less than 0.1 mm.

Key words machine vision; zoom lens pairs calibration; homography matrix; zoom lens; image matching

OCIS codes 150.0155; 150.1448; 150.1135

1 引 言

双目立体视觉系统是通过双目摄像机进行三维重建的系统, 在工业测量、机器人、生物医学等方面有着非常广泛的研究和应用^[1]。当双目系统移动

受限而要求测量范围灵活变化时, 变焦双目系统更具优势。变焦双目视觉系统是通过改变摄像机透镜组的位置来实现不同场景和尺度同时测量的三维测量系统, 由两个可调参数的变焦相机组成, 其参数包括 Zoom 调节变倍透镜的缩放、Focus 调

收稿日期: 2017-08-28; 收到修改稿日期: 2017-10-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2017033)、南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj20170501)

作者简介: 姜涛(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: jtmaster1@163.com

导师简介: 程筱胜(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事数字化设计制造、制造业信息化、数字化医疗装备等方面的研究。E-mail: smcadme@nuaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

节补偿透镜的聚焦和 Iris 光圈的调节。变焦相机参数的调整可以实现透镜组的灵活移动和测量范围的改变。相对于传统的定焦测量,变焦测量的突出优势有:测量范围变化更加灵活,不需要改变相机位置即实现不同尺度下的场景重建;定焦镜头在深度方向上的精度逐渐衰减,但是变焦镜头通过缩放可以提高分辨率和解析度,从而提高测量精度^[2]。

变焦立体视觉虽然在测量范围和精度方面具有优势,但在测量系统稳健标定^[3-6]、畸变矫正^[7]、变焦控制策略^[8]、三维重建^[9-11]等方面仍然存在着挑战,已经成为研究的焦点。定焦相机成熟的标定方法之一是张正友平面标定法^[12],多数研究者将连续变焦离散成多个固定焦距,在不同 Zoom 值下利用平面标定方法得到相机参数,再通过插值或拟合的方式建立相机参数查找表,获得任意 Zoom 值下的相机参数,其工作量巨大,在室外或复杂机器人工作环境下甚至难以实现^[13-14]。Wu 等^[15]从图像匹配点出发,假设变焦前后主点不变,利用多组匹配点在图像上连线交于主点的思想标定出相机主点,建立“Zoom/Focus”模型,将尺度参数表示成 Zoom 和 Focus 的多项式,通过大量实验计算出多项式系数,完成标定。这种方法充分利用了图像匹配点信息,主点标定获得了很好的效果,但仍然需要大量前期标定实验。增加辅助光的变焦立体视觉是另一类研究方法^[16-17],Min 等^[17]利用辅助结构光和变焦立体视觉配合,完成一定范围的三维重建,但当 Zoom 增加时,结构光编码特征失效。在多视图几何中,利用平面单应性进行多相机标定的方法提高了标定效率^[18-19],但标定精度低,且重建的三维模型仍然缺少尺度因子。

本文基于图像间存在的二维单应性矩阵,提出一种变焦立体视觉标定与三维测量方法,建立了基于变焦图像匹配点单应性变换的变焦立体视觉标定模型;利用变焦前后和双目图像单应性矩阵,推导出变焦后双目内外参数及基础矩阵的计算方法;并在构建的实验平台上进行标定和重建实验,验证了本文方法的有效性。

2 单应性矩阵估计

变焦镜头的视觉模型等效为一个光心可移动的小孔成像模型^[20]。利用双目变焦相机进行三维测量的方法,其测量原理图如图 1 所示。双目变焦相机的相对位置固定,通过调节变焦相机 Zoom 值实

现测量范围变化。假设一个变焦初始位置,左右相机坐标系分别为 $O_L^1 - x_L^1 y_L^1 z_L^1$ 和 $O_R^1 - x_R^1 y_R^1 z_R^1$,空间一点 P 在左右相机成像平面上投影点为 p_L^1 和 p_R^1 。改变 Zoom 值并自动聚焦后,左相机光心 O_L^1 移动到 O_L^2 ,右相机光心 O_R^1 移动到 O_R^2 。空间一点 P 在左右成像平面上投影点 p_L^2 和 p_R^2 。若双目系统内外参数已知,则利用视差原理可以分别重建出 P 点在变焦初始位置 $O_L^1 - x_L^1 y_L^1 z_L^1$ 坐标系和 $O_L^2 - x_L^2 y_L^2 z_L^2$ 坐标系下的三维坐标。

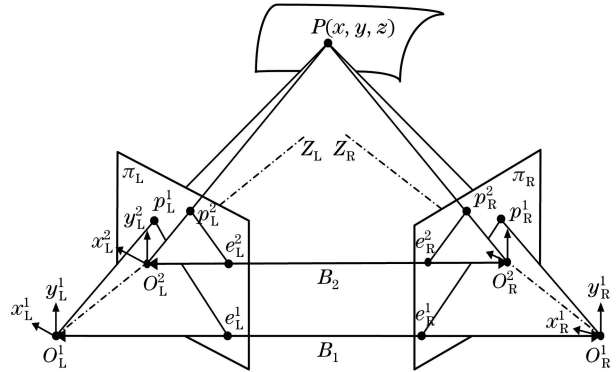


图 1 变焦立体视觉测量原理图

Fig. 1 Stereovision measurement principle diagram of zoom lens

在双目立体视觉测量中,双目相机光心位置发生改变后必须重新进行内外参数标定。利用图像二维单应性矩阵进行双目立体标定。存在任意两张图像 I_1, I_2 且有一定数量的对应匹配点 $m_1^k, m_2^k (k = 1, 2, \dots, n)$, 则图像 I_1, I_2 , 存在单应性矩阵 $H (H \in R^{3 \times 3})$, 使得 $m_2 = Hm_1$ 。利用随机抽样一致性(RANSAC)算法或迭代最近点算法^[21], 可以求得优化的单应性矩阵为

$$H^* = \arg \min \sum_{k=1}^n \|m_2^k - Hm_1^k\|^2. \quad (1)$$

在图 1 所示的测量模型中存在两类单应性矩阵:1)双目相机左右图像单应性矩阵;2)相机变焦前后图像单应性矩阵。为便于描述变焦过程单应性矩阵,假设光心位置不变,左右相机变焦前后图像平面发生变化,如图 2 所示。

图 2 中,仍然假设一个变焦初始位置,左右图像单应性矩阵为 H_{LR}^1 。改变 Zoom 值后,左右相机图像平面单应性矩阵分别为 H_L^{12}, H_R^{12} 。空间一点 P 在 4 个图像平面投影点分别为 $p_L^1, p_R^1, p_L^2, p_R^2$, 根据投影点之间单应性矩阵的传递性可得:

$$H_{LR}^2 = H_L^{12} H_{LR}^1 (H_R^{12})^{-1}. \quad (2)$$

上述推导过程可知,改变变焦相机参数后的任意图像平面均可求出单应性矩阵。

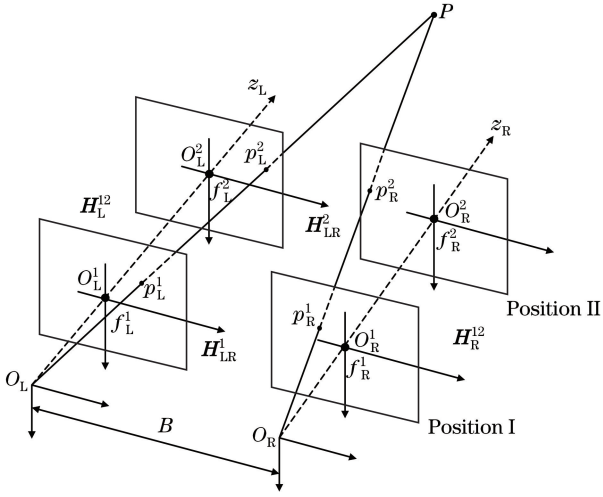


图 2 变焦过程单应性矩阵示意图

Fig. 2 Diagram of homography matrix in zoom process

3 变焦双目视觉标定

求解出单应性矩阵后,即可进行变焦立体标定和三维重建。双目立体标定参数包括内参、外参、畸变系数^[22]。如图 2 所示,变焦后的立体标定即求解位置 II 处双目内外参数,在位置 I 时进行了张正友平面标定,即初始位置双目内外参数已知。

3.1 内参线性估计

以左相机为例,求解变焦后的相机内参。变焦前后空间点 P 在两个图像上的对应点为 $p_L^1(x_L^1, y_L^1)$ 和 $p_L^2(x_L^2, y_L^2)$ 。如果 m 个空间点产生正确匹配点 m 对,则可定义变焦缩放系数 r_u 、 r_v 和 r_f 为

$$\begin{cases} r_{Lu} = \frac{x_{L1}^2 - u_{L0}^2}{x_{L1}^1 - u_{L0}^1} = \frac{x_{L2}^2 - u_{L0}^2}{x_{L2}^1 - u_{L0}^1} = \dots = \\ \frac{x_{Lm}^2 - u_{L0}^2}{x_{Lm}^1 - u_{L0}^1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{x_{Li}^2 - u_{L0}^2}{x_{Li}^1 - u_{L0}^1} \right) \\ r_{Lv} = \frac{y_{L1}^2 - v_{L0}^2}{y_{L1}^1 - v_{L0}^1} = \frac{y_{L2}^2 - v_{L0}^2}{y_{L2}^1 - v_{L0}^1} = \dots = \\ \frac{y_{Lm}^2 - v_{L0}^2}{y_{Lm}^1 - v_{L0}^1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left(\frac{y_{Li}^2 - v_{L0}^2}{y_{Li}^1 - v_{L0}^1} \right) \\ r_{Lf} = \frac{f_L^2}{f_L^1} \end{cases} \quad (3)$$

根据变焦前后图像平面平行的约束可以确定 $r_{Lu} = r_{Lv} = r_{Lf}$,且主点不变。假设初始位置的内参矩阵为 \mathbf{K}_L^1 ,变焦后的内参矩阵为 \mathbf{K}_L^2 ,则可确定内参矩阵之间的单应性矩阵 \mathbf{H}_L^{12} ,使得:

$$\mathbf{K}_L^2 = \mathbf{H}_L^{12} \mathbf{K}_L^1, \quad (4)$$

$$\text{式中 } \mathbf{K}_L^1 = \begin{bmatrix} f_L^1 & u_{L0} \\ & f_L^1 & v_{L0} \\ & & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{K}_L^2 = \begin{bmatrix} f_L^2 & u_{L0} \\ & f_L^2 & v_{L0} \\ & & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_L^{12} = \begin{bmatrix} r_{Lu} & (1-r_{Lu})u_{L0} \\ & r_{Lv} & (1-r_{Lv})v_{L0} \\ & & 1 \end{bmatrix}.$$

同理可以获得右相机变焦前后的单应性矩阵 \mathbf{H}_R^{12} 。可见,变焦前后单应性矩阵包含了主距、主点等内参信息,所以,找到变焦前后图像的正确匹配点便可以根据初始位置的内参来估算变焦后的相机内参。

3.2 双目外参计算

图 3 是相机光心移动的示意图, O_L^1 、 O_R^1 分别为初始位置时左右相机光心, O_L^2 、 O_R^2 为变焦后左右相机光心。

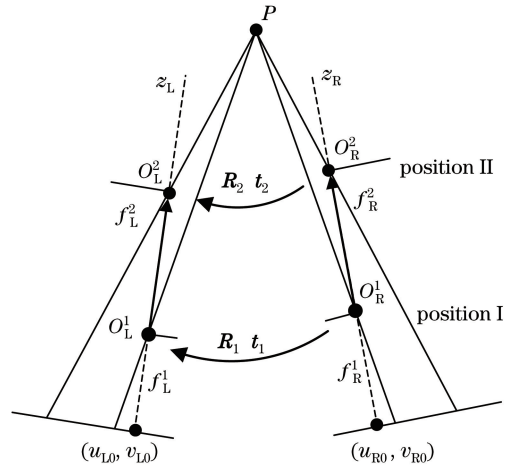


图 3 双目外参求解示意图

Fig. 3 Diagram of solving binocular external parameters

位置 I 双目外参为 $\mathbf{M}_1 = [\mathbf{R}_1 | \mathbf{t}_1]$,位置 II 外参为 $\mathbf{M}_2 = [\mathbf{R}_2 | \mathbf{t}_2]$, $\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i (i=1,2)$ 分别表示在位置 I 和位置 II 处,双目相机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。空间一点 P 在双目变焦前后的 4 个图像平面上的成像点之间可以相互转换,即满足:

$$\begin{cases} \hat{p}_R^2 = \mathbf{M}_2 \hat{p}_L^2 \\ \hat{p}_R^2 = \mathbf{T}_{o_R^2 o_L^2} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_{o_L^2 o_L^1} \hat{p}_L^1 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 \hat{p}_L^1 、 \hat{p}_R^2 分别为位置 II 处图像点 p_L^1 、 p_R^2 的齐次坐标, $\mathbf{T}_{o_L^2 o_L^1}$ 、 $\mathbf{T}_{o_R^2 o_R^1}$ 分别为双目光心的变换矩阵。由 (5) 式可得:

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{T}_{o_R^2 o_R^1} \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_{o_L^2 o_L^1}, \quad (6)$$

即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_2 & \mathbf{t}_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O}_{R^2 O_R^1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{t}_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O}_{L^2 O_L^1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{O}_{L^2 O_L^1} = [0 \ 0 \ (r_{Lf}-1)f_L^1]^T$, $\mathbf{O}_{R^2 O_R^1} = [0 \ 0 \ (1-r_{Rf})f_R^1]^T$, $\mathbf{I} = \text{diag}(1, 1, 1)$ 。将 (7) 式

展开后可得:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{t}_2 = \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{O}_L^1 \mathbf{O}_L^2 + \mathbf{t}_1 + \mathbf{O}_R^2 \mathbf{O}_R^1 \end{cases} \quad (8)$$

(8)式表明变焦后双目旋转矩阵没有发生改变,但光心相对平移。这一点与实际相符。由变焦过程可知,绝对理想情况下,左右相机的光心仅发生了平移变换而没有旋转变换。

3.3 畸变系数与非线性优化

随着焦距的增加,镜头的畸变也逐渐增加,影响了图像质量和重建精度。结合已求解的双目参数,考虑畸变系数后进行视觉系统的全参数非线性优化。仍以左相机为例,在位置 II 处,世界坐标系到图像坐标系的投影矩阵为 \mathbf{P}_L^2 ,则图像无畸变的点齐次坐标为 $\hat{p}_L^2 = \mathbf{P}_L^2 \hat{P}$,有畸变的点图像坐标为 $p_L^2(x_L^2, y_L^2)$,只考虑径向畸变,则有:

$$\begin{cases} x_L^2 = x_L^2 [1 + \rho_1 S(x_L^2, y_L^2) + \rho_2 S(x_L^2, y_L^2)^2] \\ y_L^2 = y_L^2 [1 + \rho_1 S(x_L^2, y_L^2) + \rho_2 S(x_L^2, y_L^2)^2] \end{cases} \quad (9)$$

式中 $S(x, y) = x^2 + y^2$, ρ_1, ρ_2 为径向畸变系数。无畸变的图像点与畸变点之间相差畸变系数,利用最小化径向畸变的方法进行非线性优化,可求出内外参数的最优解,即

$$f(\Phi) = \arg \min_{i \in V_0} \|\hat{p}_{L_i}^2(\hat{m}_i, K_L^2, \rho_1, \rho_2) - \hat{p}_{L_i}^2(\hat{M}_i, \mathbf{R}_2, t_2)\|^2, \quad (10)$$

式中 V_0 为变焦后特征点集合, \hat{m}_i 为特征点图像坐标, \hat{M}_i 为对应标定板的坐标, Φ 表示相机内外参的集合。

4 实验验证

综上所述,利用匹配点进行变焦后双目内外参数求解及三维重建,步骤如下:

1) 图像采集。固定变焦相机和圆形标定板,在

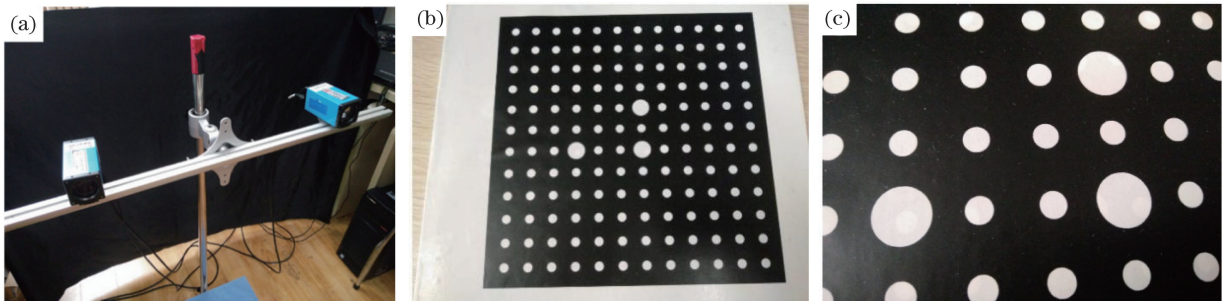


图 4 (a)变焦双目相机;(b)标定板;(c) Zoom 较大时采集标定板示意图

Fig. 4 (a) Zoom lens binocular cameras; (b) calibration board; (c) calibration board under a large zoom value

Zoom X 下分别采集图像。其中, X 为 Zoom 值的大小,其范围为 $0 \sim 100$ 。 X 越大, Zoom 值越大,选择初始 $X = 40$,其步距为 5。采集完成后,改变圆形标定板位置并重复上述步骤。选择 10 个 Zoom 值,每个 Zoom 下左右相机采集 10 张图像。

2) 张正友平面标定。在初始位置,选择较小的 Zoom 值,利用圆形标志的标定板进行张正友平面标定,得到基础位置时内参 $\mathbf{K}_L^1, \mathbf{K}_R^1$ 和外参 $\mathbf{M}_1 = [\mathbf{R} | t_{LR}^1]$,计算出单应性矩阵 \mathbf{H}_{LR}^1 。同时,标定不同 Zoom 下内外参数和单应性矩阵作为真值,用于精度检验。

3) 不同 Zoom 下的内外参数计算。利用标定板的特征点进行图像匹配,求解变换矩阵 $\mathbf{H}_L^{12}, \mathbf{H}_R^{12}$,利用(4)、(8)式分别计算变焦后的双目内参和外参,同时求得基础矩阵,完成标定。

4) 变焦立体重建。根据图像平面单应性变换求得匹配点,利用视差原理或三角法进行平面快速重建。

4.1 变焦立体视觉标定结果及分析

在实验中,采用 2 个 IMG DFK Z12G445 变焦相机,焦距变化范围为 $4.8 \sim 56$ mm。圆形标定板由大圆和小圆组成^[23],大、小圆直径分别为 16、12 mm,圆间距为标准值 15 mm,标定板经精密制作而成,本文将尺寸参数作为真值。利用这一平面靶标的目的是在设定的 Zoom 下进行张正友平面标定,从而验证本文方法的精度。在实际操作时,只需要在初始位置利用平面靶标标定一次,改变变焦镜头焦距后则不需再次标定。实验设备如图 4 所示。

利用本文方法求解不同 Zoom 下的相机内外参数如表 1 所示。

为形象地描述 Zoom 的变化,标定的内外参数与计算参数的变化,将张正友平面标定的结果作为真值,绘制曲线图,如图 5 所示。

表 1 变焦镜头参数对比
Table 1 Parameters of zoom lens

Zoom X	Focal length f_L/f_R /mm		Principal point $(u_L, v_L)/(u_R, v_R)$ /pixel	Translation vector	
	Zhang's method	Proposed method		Zhang's method	Proposed method
40	10.2022125/	no	(648.438, 511.487)	(-405.353, 11.50470,	no
	10.1105250		115.941)		
45	11.3933625/	11.3420625/	(653.799, 519.974)	(-406.591, 9.59086,	(-406.280, 9.57893,
	11.3850750	11.2539000	(584.003, 559.404)	122.245)	122.795)
50	12.8003625/	12.7021875/	(655.699, 522.811)	(-409.124, 11.24640,	(-408.767, 11.23000,
	12.7695000	12.7162125	(581.148, 570.349)	123.514)	124.103)
55	14.5618125/	14.3880000/	(671.492, 534.388)	(-413.099, 11.31770,	(-412.663, 11.29800,
	14.5151250	14.3808750	(569.970, 582.627)	124.851)	125.598)
60	16.7451375/	16.4294625/	(698.841, 543.614)	(-423.470, 12.35340,	(-422.960, 12.33140,
	16.3551000	16.4222625	(601.728, 590.008)	106.413)	107.173)
65	19.1872500/	19.0587750/	(681.361, 521.891)	(-428.167, 10.98880,	(-427.532, 10.95700,
	18.8562375	18.6571875	(573.561, 598.445)	116.201)	117.279)
70	22.3601625/	22.0710375/	(726.319, 520.572)	(-432.387, 10.64820,	(-431.601, 10.61000,
	21.6992250	21.7093500	(578.317, 604.792)	104.317)	105.516)
75	26.3140125/	25.8063375/	(743.855, 503.384)	(-420.765, 7.51689,	(-419.783, 7.45610,
	27.1225125	24.9868500	(231.646, 690.784)	171.149)	173.743)
80	30.5064375/	30.6684750/	(639.600, 479.047)	(-413.616, 3.62142,	(-412.380, 3.53481,
	32.6452125	30.9844625	(618.662, 579.100)	212.744)	215.086)
85	36.1005000/	35.5908375/	(591.922, 387.185)	(-444.908, 9.34525,	(-443.562, 9.24800,
	35.9662500	35.1420000	(499.214, 450.762)	133.204)	134.031)

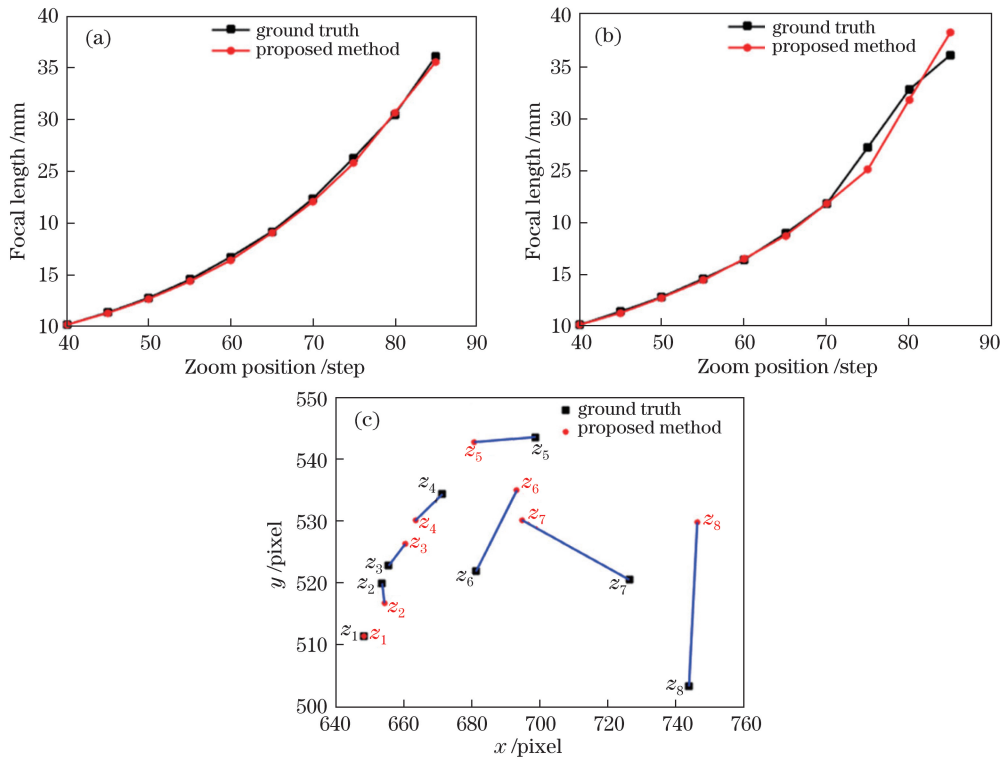


图 5 不同 Zoom 参数下相机焦距和主点曲线。(a)左相机焦距值;(b)右相机焦距值;(c)左相机主点坐标
Fig. 5 Focal lengths of (a) left camera, (b) right camera and (c) main point of left camera under different zoom values

由图 5(a)、(b)可知,随着 Zoom 值增大,焦距增加。利用单应性矩阵计算的焦距与标定真值吻合较好。另外,本文假设变焦前后的主点坐标不变,但是从标定结果看,左右相机的的主点均发生变化。同时利用单应性矩阵作用于初始位置的内参矩阵,可以计算出主点坐标。图 5(c)描述了这一现象,即主点随着 Zoom 改变且计算主点与标定主点的误差越来越大。

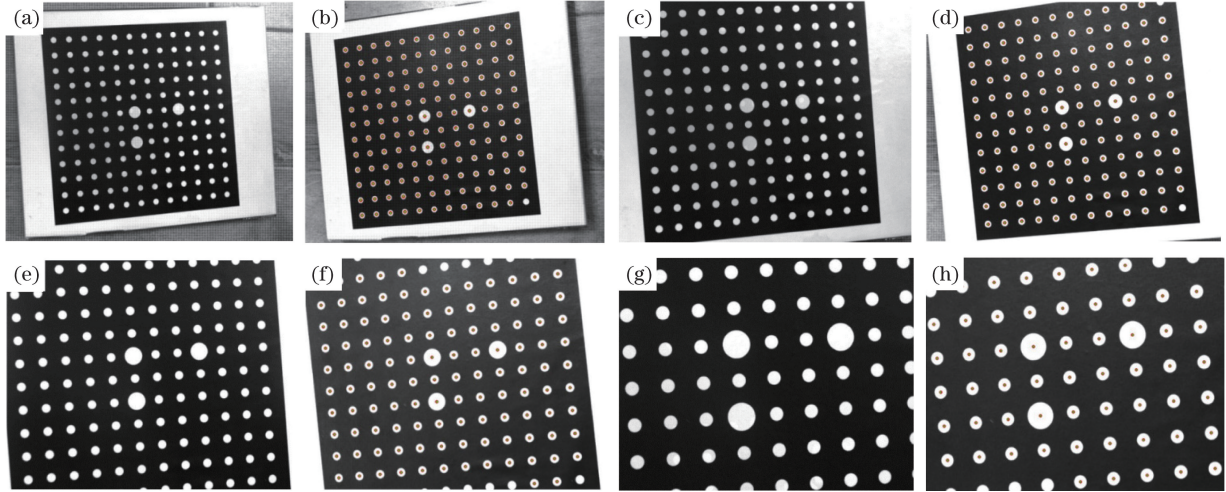


图 6 重投影图像示意图。(a) Zoom 45 左视图;(b) Zoom 45 右视图;(c) Zoom 55 左视图;(d) Zoom 55 右视图;
(e) Zoom 65 左视图;(f) Zoom 65 右视图;(g) Zoom 80 左视图;(h) Zoom 80 右视图
Fig. 6 Reprojective images. (a) Left and (b) right views in Zoom 45; (c) left and (d) right views in Zoom 55;
(e) left and (f) right views in Zoom 65; (g) left and (h) right views in Zoom 80

右视图中,红色标记点是理想点,而绿色标记点是通过计算的单应性矩阵变换的重投影点,可以看出,Zoom X 下红色标记点与绿色标记点吻合的很好。为量化误差,计算归一化后的 \mathbf{H} 和 \mathbf{H}_R 的 2 范数作为单应性误差 e_1 ,计算投影点 $\mathbf{p}_L^T \mathbf{H}$ 与右相机图像真实点 \mathbf{p}_R^2 的 2 范数作为重投影误差 e_2 ,具体计算为

$$\begin{cases} e_1 = \|\mathbf{H} - \mathbf{H}_R\|_2^2 \\ e_2 = \sum_{i \in V_3} \|\mathbf{p}_L^T \mathbf{H} - \mathbf{p}_R^2\|_2^2 \end{cases}, \quad (11)$$

式中 V_3 为变焦后右图像的匹配点集。计算 Zoom X 下 9 个标定板位置处的 e_1 和 e_2 ,如图 7 所示。

由图 7(a)可知,归一化的单应性误差 e_1 小于 0.01 而接近 0,说明本文计算出的单应性矩阵已经逼近真实值。而图 7(b)中,重投影误差均小于 1 pixel,在短焦时重投影误差趋近于 0,精度较高。

4.2 变焦重建结果及分析

在利用变焦双目视觉系统进行重建时,利用在 Zoom 45 参数进行张正友平面标定,标定完成后,可以重建此时的标记点。通过改变变焦镜头参数,求解出变焦后的双目内外参数,并重建标记点。此时,

为减少主点偏差和重建误差,本文利用单应矩阵求出的主距和初始位置的主点来构造变焦后的内参矩阵。

为验证本文单应性矩阵的计算精度,在位置 II 时,比较(2)式计算出的单应性矩阵 \mathbf{H} 与 RANSAC 算法求解的单应性矩阵 \mathbf{H}_R 进行比较,将左相机图像标记点投影到右相机图像上。以每个 Zoom 下的第一个标定板位置为例,如图 6 所示。

仍然设置 Zoom 步距为 5,以便利用已经完成的张正友平面标定对重建的结果进行对比,来说明重建效果。在实际应用中,按照本文方法可以实现任意 Zoom 参数下的平面物体重建。重建结果如图 8 所示。

重建原理是基本的双目视觉原理,由变焦双目特性可知,相机的光心在移动,世界坐标系原点位置改变,所以不同参数下重建结果呈金字塔形状。如果将不同 Zoom 下的重建结果变换到初始位置,则对应点应与初始位置重合。

为量化重建误差,测量重建标定板的点间距,并与标准间距(15 mm)比较。一个 Zoom 下测量的标定板全部点间距的误差平均值作为该 Zoom 下的重建误差。利用不同 Zoom 标定的方法和本文方法获得的重建误差如图 9 所示。

图 9 中,在不同 Zoom 下进行标定的方法重建误差小于 0.06 mm,而利用单应性矩阵标定方法重建误差小于 0.08 mm,重建精度均小于 0.1 mm 且误差较为接近,证明了本文方法的有效性。进一步分析可知,Zoom 增加,重建误差呈下降趋势,表明 Zoom 增加时,重建精度有所提高。

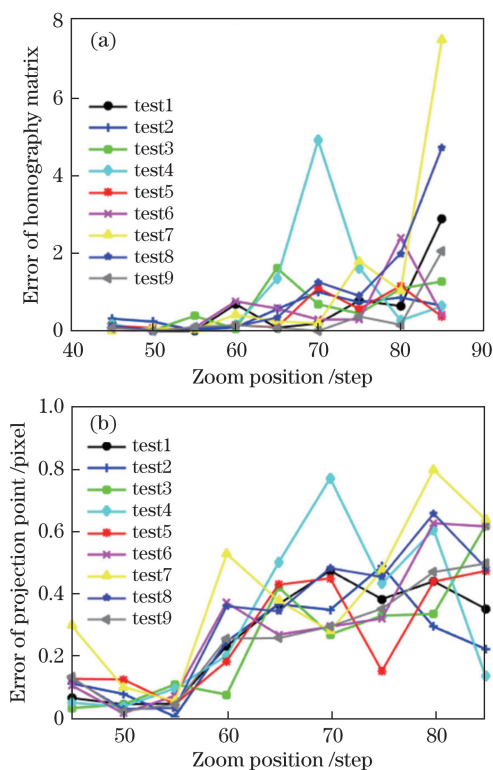


图 7 (a)单应性矩阵误差;(b)重投影点误差
Fig. 7 (a) Homography matrix error;
(b) reprojective point error

对标准台阶块进行重建实验,如图 10(a)所示,台阶块由一些平面组成,表面具有一定的特征。可以采用平面单应性变换进行快速匹配和重建,具体做法是:手动设置右图像的感兴趣区域,将标定块分割成 3 个平面;利用尺度不变特征变换(SIFT)算法进行特征匹配;利用匹配点求解左右图像平面单应性矩阵,在左图像中计算特征点的最小包围矩形,然后利用单应性矩阵将左图像包围矩形内的点转到右图像并作为匹配点;利用视差原理进行重建。不同 Zoom 下感兴趣区域大小不同,在 Zoom 50 和 Zoom 80 分别进行重建实验。并采用极线约束结合 SIFT 算法进行重建的对比实验。其结果如图 10 所示。

对比图 10(b)、(d)可知,利用单应性变化的方法获得了良好的重建结果。在 Zoom 80 下重建的范围较小,最高的台阶面只重建了一部分,重建点间距均值为 0.107 mm;在 Zoom 50 重建出了全部的台阶面,重建点间距均值为 0.228 mm。图 10(c)、(e)是利用 SIFT 算法结合极线约束进行重建的点云,Zoom 较大时,重建的台阶面不完全但点云更稠密,统计第一个台阶平面重建点数为 1477,而 Zoom 较小时统计第一个台阶面重建点数量只有 283。

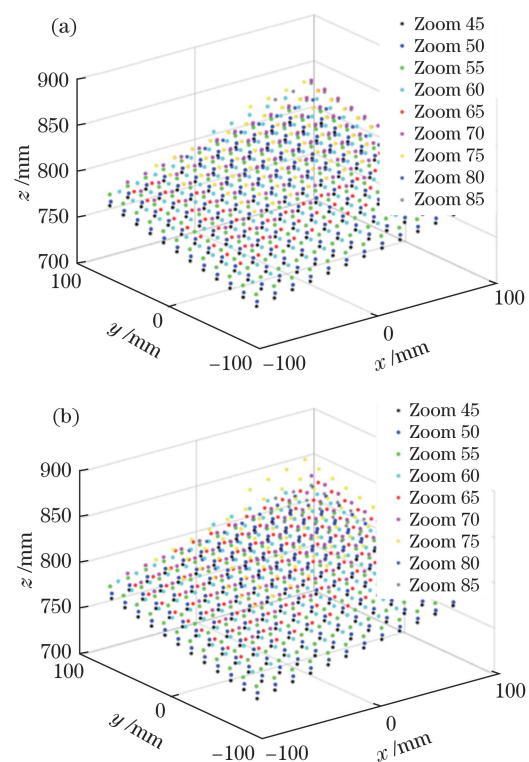


图 8 变焦立体重建示意图。(a)不同 Zoom 值下标定的重建结果;(b)本文方法重建结果

Fig. 8 Stereo reconstruction with zoom lens.
(a) Reconstruction result with calibration parameters under different zoom values; (b) reconstruction result with the proposed method

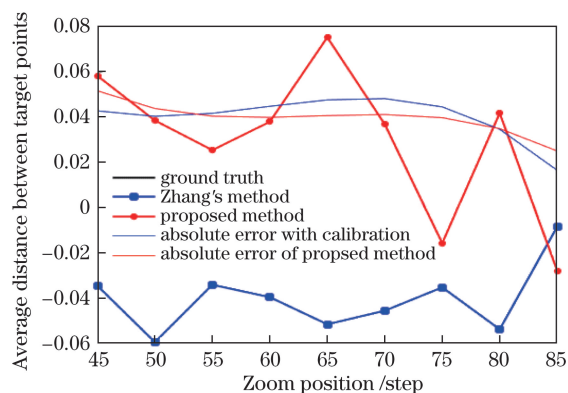


图 9 重建误差示意图

Fig. 9 Reconstruction error diagram

进一步分析可得,Zoom 增加时,相机视场减小,但由于相机分辨率不变,所以单位长度的图像解析度更高,即世界坐标系中一个区域中的点映射到了图像平面中更多像素点,图像中场景的细节表达更清晰。又因为单应性矩阵作用于图像的像素点,所以获得了更加致密的重建结果,重建质量更高。同样,利用 SFIT 算法进行特征点查找和匹配时,每个灰度极值点都构建了一个 128 维的

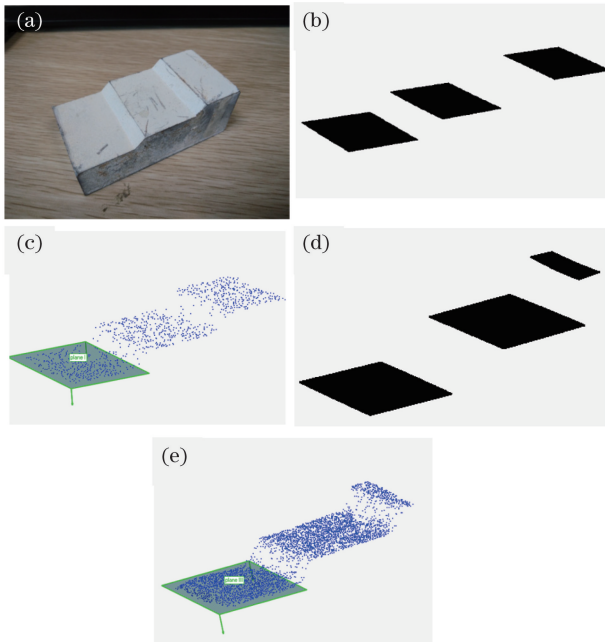


图 10 不同 Zoom 下标准台阶块重建结果。(a)标准块实物；
(b) Zoom 50 重建结果；(c) Zoom 50 对比实验；
(d) Zoom 80 重建结果；(e) Zoom 80 对比实验

Fig. 10 Reconstruction results of standard bench block under different zoom values. (a) Physical map of standard block;
(b) reconstruction under zoom value of 50;
(c) compared results of (b); (d) reconstruction under zoom value 80; (e) compared results of (d)

特征向量,特征向量的元素包含了像素灰度、梯度、二阶梯度等信息。在 Zoom 较小时,图像中极值点不明显,且构造的特征向量间距大,导致匹配点数量少,重建的点云稀疏,但是可以获得整体轮廓。

5 结 论

提出了基于变焦图像匹配点单应性变换的变焦立体视觉标定与测量方法,以及变焦后双目内外参数的计算方法。在实际操作时,首先设置初始位置,进行张正友平面标定;改变镜头参数后,根据前后图像匹配点估计内外参数,进一步获得双目参数,实现重建。单应矩阵的方法受限于平面物体,对平面物体重建精度较高,平面单应矩阵重建速度更快,同时变焦缩放特性可以获得更高的分辨率和解析度。本文方法避免了大量前期视觉系统的标定工作,提高了测量效率,且保持高精度的测量效果。变焦双目视觉测量系统是一种比较新的立体测量方式,能够解决在双目系统移动受限而要求测量范围灵活变化的问题,有利于变尺度光学测量发展。

参 考 文 献

- [1] Wang S, Xu X. 3D reconstruction based on horopter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515004.
王珊,徐晓.基于双目单视面的三维重建[J].光学学报,2017,37(5):0515004.
- [2] Wan D R, Zhou J. Stereo vision using two PTZ cameras[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 112(2): 184-194.
- [3] Oh J, Sohn K. Semiautomatic zoom lens calibration based on the camera's rotation[J]. Journal of Electronic Imaging, 2011, 20(2): 023006.
- [4] Arfaoui A, Thibault S, Desaulniers P. Calibration of ofzoom lens with virtual optical pattern[J]. Optical Engineering, 2015, 54(5): 054107.
- [5] Frosio I, Turrini C, Alzati A. Camera re-calibration after zooming based on sets of conics[J]. Visual Computer, 2016, 32(5): 663-674.
- [6] Wang Z, Mills J, Xiao W, et al. A flexible, generic photogrammetric approach to zoom lens calibration[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 244.
- [7] Alvarez L, Gómez L, Henríquez P. Zoom dependent lens distortion mathematical models[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2012, 44(3): 480-490.
- [8] Dou S Y, Nagahashi H. An intelligent binocular vision system with zoom lens for 3D scene reconstruction[J]. International Journal of Computer and Electrical Engineering, 2016, 8(6): 304-318.
- [9] Xian T, Park S Y, Subbarao M. New dynamic zoom calibration technique for a stereo-vision based multi-view 3D modeling system[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5606: 106-116.
- [10] Liu P C, Willis A, Sui Y F. Stereoscopic 3D reconstruction using motorized zoom lenses within an embedded system[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7251: 72510W.
- [11] Rodríguez J A M. Three-dimensional recovering based on variable focal length via Bezier networks[J]. The Imaging Science Journal, 2015, 63(3): 145-159.
- [12] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [13] Zhang X B, Lu H, Fang Y C, et al. An automatic calibration method for outdoor PTZ cameras and its applications[J]. Robot, 2013, 35(4): 385-393.
张雪波,路晗,方勇纯,等.室外环境下PTZ摄像机全自动标定技术及其应用[J].机器人,2013,35(4):385-393.
- [14] Zheng S Y, Wang Z, Huang R Y. Zoom lens calibration with zoom- and focus-related intrinsic parameters applied to bundle adjustment[J]. ISPRS

- Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 102: 62-72.
- [15] Wu B, Hu H, Zhu Q, *et al.* A flexible method for zoom lens calibration and modeling using a planar checkerboard[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2013, 79(6): 555-571.
- [16] Cheng M J, Shen X J, Xiao J J, *et al.* Three-dimensional calibration of fisheye camera based on laser scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0315001.
程梦娇, 申夏晶, 肖江剑, 等. 基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0315001.
- [17] Kim M Y, Ayaz S M, Park J, *et al.* Adaptive 3D sensing system based on variable magnification using stereo vision and structured light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 55(7): 113-127.
- [18] Ueshiba T, Tomita F. Plane-based calibration algorithm for multi-camera systems via factorization of homography matrices[C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2003, 2(2): 966-973.
- [19] Zou P P, Zhang Z L, Wang P, *et al.* Binocular camera calibration based on collinear vector and plane homography[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1115006.
邹朋朋, 张滋黎, 王平, 等. 基于共线向量与平面单应性的双目相机标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1115006.
- [20] Shi Y Q. Positioning and measurement techniques with zoom tracking cameras[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
史艳琼. 变焦摄像机跟踪定位与测量技术[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [21] Guo Q D, Quan Y M, Yu G P, *et al.* Improved binocular calibration based on ICP algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1215003.
郭清达, 全燕鸣, 于广平, 等. 基于 ICP 算法的双目标定改进方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1215003.
- [22] Yang J H, Liu W, Liu Y, *et al.* Calibration of binocular vision measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 300-308.
杨景豪, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 300-308.
- [23] Cui H H, Liao W H, Cheng X S, *et al.* Robust pattern locating algorithm for calibration of vision sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 62-65, 69.
崔海华, 廖文和, 程筱胜, 等. 用于视觉传感器标定的鲁棒性靶标定定位算法[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 62-65, 69.